

变压器

故障诊断与维修

BIANYAQI

GUZHANG ZHENDUAN YU WEIXIU



主编◎姜国庆 李璐



电子科技大学出版社

主编◎姜国庆 李 璐

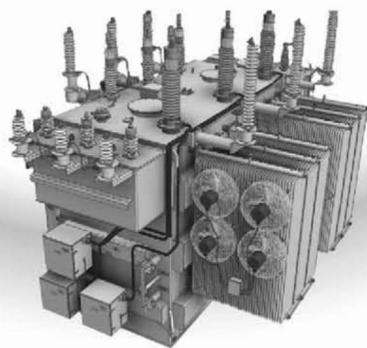
变压器

故障诊断与维修

BIANYA QI

GUZHANG ZHENDUAN YU WEIXIU

常州大学图书馆
藏书章



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器故障诊断与维修 / 姜国庆, 李璐主编. — 成都: 电子科技大学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5647-3388-9

I. ①变… II. ①姜… ②李… III. ①变压器—故障诊断②变压器—维修 IV. ① TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 302691 号

变压器故障诊断与维修

姜国庆 李璐 主编

出 版: 电子科技大学出版社
地 址: 成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 (邮编 610051)
策划编辑: 辜守义
责任编辑: 辜守义
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 四川永先数码印刷有限公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 15 字数 360 千字
版 次: 2015 年 12 月第 1 版
印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-3388-9
定 价: 36.00 元

版权所有★侵权必究

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

随着我国国民经济的快速稳定发展，对电能需求的迅速增长，我国电网的规模日益扩大。在电力系统向超高压、大容量、大电网、自动化方向发展的同时，提高电力设备的运行可靠性和稳定性更为重要。根据国内外电力运行的经验，电压等级越高、容量越大，电气设备的故障发生率一般也越高，修复时间也越长。电力设备损坏给社会各行各业的经济运行及群众的生活造成巨大的损失和不便。

电力变压器是电力系统中最关键的设备之一，它承担着电压变换、电能分配和传输的任务，并提供各种电力服务。因此，变压器的正常运行是对电力系统安全、可靠运行的重要保证，必须最大限度地防止和减少变压器故障和事故的发生。引发变压器事故和故障的原因是多方面的，如外力的破坏和影响，不可抗拒的自然灾害，安装、检修、维护中存在的问题和制造过程中遗留的设备缺陷等。故障诊断及维修涉及变压器的运行机理、故障发生发展的机制、装置维护的现状、运行条件等因素，因而是一项复杂的技术性工作，具有非常重要的现实意义。本书是为了帮助广大工程技术人员和电力技术工人了解和掌握变压器故障的诊断及变压器故障的检修、维修技术而编写的。

由于编写水平和能力所限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评、指正。

编 者
2015年8月

目 录

第 1 章 变压器基础知识	(1)
1.1 变压器常用术语	(1)
1.2 变压器的工作原理	(3)
1.3 变压器的分类	(6)
1.4 变压器的结构	(7)
1.5 变压器的运行要求	(18)
第 2 章 高压试验故障	(23)
2.1 避雷器带电测试和红外检测异常	(23)
2.2 GIS 组合电器超声局放测试点存在异常电信号	(24)
2.3 电容器组电缆头压接处发热	(26)
2.4 支持绝缘子构架接地电阻导通测试无法测得数据	(27)
2.5 避雷器受潮劣化后检测数据异常	(28)
2.6 电压互感器本体温度异常	(29)
2.7 变压器现场局放试验及故障诊断	(30)
2.8 变压器绕组变形缺陷	(33)
2.9 110 kV 穿墙套管介损和电容量超标	(34)
2.10 220 kV 电流互感器直流电阻偏大	(36)
2.11 断路器瓷套本体温度异常红外诊断	(36)
第 3 章 变压器类设备典型缺陷	(38)
3.1 500 kV 某变电站 1 号主变压器 B 相油化验异常情况	(38)
3.2 500 kV 某变电站 4 号主变压器 500 kV 侧 C 相套管闪络分析	(43)
3.3 500 kV 某变电站主变压器套管介损明显增长情况分析	(48)
3.4 220 kV 某变电站 2 号主变压器故障分析	(55)
3.5 220 kV 某变电站 110 kV 进中甲线 123 电流互感器 A 相气压低缺陷分析	(58)
3.6 220 kV 某变电站 222 电压互感器 A 相介质损耗因数超标分析	(61)

3.7	220 kV 某变电站 10 kV 52 乙电压互感器接地故障抢修情况	(63)
3.8	220 kV 某变电站 7 号电容器 528 断路器缺陷分析	(65)
第 4 章	母线保护装置	(68)
4.1	母线保护装置液晶屏幕显示异常处理	(68)
4.2	母线保护装置开入异常处理	(69)
4.3	母线保护运行灯灭(闪烁)处理	(71)
4.4	母线保护告警无法复归处理	(73)
4.5	母线保护电压断线或电压异常处理	(74)
4.6	母线保护差流异常(电流回路断线告警)处理	(75)
4.7	母线保护母线电压开放处理	(77)
4.8	母线保护装置报互联处理一	(79)
4.9	母线保护装置报互联处理二	(81)
4.10	母线保护隔离开关变位告警处理	(83)
4.11	母线保护动作或指示不正确处理	(84)
第 5 章	交流系统和直流系统	(87)
5.1	交流系统	(87)
5.2	直流系统	(99)
第 6 章	变压器异常运行	(117)
6.1	储油柜设计不当变压器油位超高误报警	(117)
6.2	变压器有载分接开关主轴断裂	(119)
6.3	主变压器有载调压油箱频繁报轻瓦斯信号	(121)
6.4	主变压器内部放电	(124)
6.5	主变压器遭雷击	(126)
6.6	强油风冷变压器油温超高	(128)
6.7	变压器铁芯多点接地	(131)
6.8	变压器冷却器油流继电器挡板断裂	(132)
6.9	变压器有载分接开关过渡电阻烧断	(134)
6.10	变压器发出异常噪声	(136)
6.11	变压器中压绕组和部分铁芯烧损	(140)
第 7 章	变压器短路故障	(145)
7.1	电厂升压变压器低压侧短路	(145)
7.2	变压器低压侧遭雷击引起相间短路	(149)

7.3	变电站主变压器出口短路	(152)
7.4	变电站主变压器低压侧线路连续短路	(154)
7.5	变电站主变压器匝间短路	(157)
7.6	变电站低压电缆出线短路	(160)
7.7	变压器短路防范措施	(163)
7.8	变压器绕组变形测试综述	(163)
第8章	配电装置异常运行	(175)
8.1	阻波器绕组严重烧损	(175)
8.2	阻波器主导流接触部位放电冒弧	(176)
8.3	220 kV 出线门型架构跨线绝缘子串脱落	(177)
8.4	220 kV 铜铝过渡线夹断裂	(180)
8.5	保护装置失去直流电源造成全站失压	(183)
第9章	二次设备异常事故	(188)
9.1	二次设备典型事故或异常实例	(188)
9.2	二次设备事故或异常处理训练	(203)
第10章	变压器检修	(212)
10.1	有载调压开关重瓦斯保护动作	(212)
10.2	有载调压变压器油路渗透	(213)
10.3	主变压器本体油位指示异常	(214)
10.4	主变压器本体各密封处渗漏油	(215)
10.5	主变压器呼吸器硅胶受潮	(217)
10.6	主变压器冷却器风扇故障	(219)
10.7	主变压器分接开关操动机构滑挡	(220)
10.8	主变压器气体继电器动作	(222)
10.9	互感器本体油位异常及渗漏油	(223)
参考文献	(225)

第1章 变压器基础知识

1.1 变压器常用术语

额定值：标注在变压器类产品铭牌上的，用来表示该产品在规定条件下运行特征的一组参数的数值。

额定参数：用额定参数的数值表示变压器的运行特征，它包括额定容量、额定电流、额定频率及额定温升等。

额定容量：标注在绕组上的视在功率的习惯用值，与绕组的额定电压一起决定额定电流值。

额定电压(绕组的)：在三相变压器或三相电抗器线路端子之间，或者在单相变压器或单相电抗器端子之间，指定施加的或空载时感应出指定的电压。

额定电压比(变压器的)：一个绕组的额定电压对另一个绕组的额定电压比。后一绕组的额定电压可以较低，也可以与前一绕组的额定电压相等。

额定频率：变压器类产品设计所依据的交流电源频率。

额定电流(绕组的)：流过绕组线路端子的电流，它等于绕组额定容量除以绕组额定电压和相应的相系数，单相时，相系数为1；三相时，相系数为 $\sqrt{3}$ 。

额定连续电流：对于接地变压器，指其设计所依据的在额定电压和额定频率下流过中性点的连续电流值。

额定短时电流：对于接地变压器，指能承受规定时间下的中性点电流值。

分接头：为改变电压比(又称为变比或变压比)而在绕组上引出的抽头。

主分接(额定分接)：与额定参数相对应的分接。

分接因数：指比值 U_d/U_N (分接因数)或 $\frac{U_d}{U_N} \times 100\%$ (分接因数百分值)。其中， U_N 为绕组的额定电压； U_d 为对不带分接的绕组施加电压时，处于指定分接位置的绕组端子之间在空载时所感应出的电压。

分接电压比(对绕组的)当带分接的绕组是高压绕组时，其分接电压比等于电压比乘以该绕组的分接因数。当带分接的绕组是低压绕组时，其分接电压比等于电压比除以该绕组的分接因数。

满容量分接：分接容量等于额定容量的分接。

降低容量的分接：分接容量小于额定容量的分接。

连接组标号：用一组字母及时钟序数来表示变压器高压、中压(如果有)和低压绕组的连接方式，以及中压、低压绕组对高压绕组相对相位移的通用标号。

相位移(变压器的)：当正序电压系统施加于按字母或数字顺序标志的高压端子时，中性点(真实的或假想的)与低压(中压)绕组线路端子间的电压相量，对该中性点与高压绕

组对应线路端子间的电压相量的角度差。相量均假定为逆时针方向旋转。

对应端子：变压器不同绕组标注相同字母或符号的端子。

绕组连接图：表示变压器各绕组之间或一个绕组的分接头间的电气连接和相对位置关系的示意图。

总损耗：空载损耗和负载损耗之和。

负载损耗：

(1) 双绕组变压器(对于主分接)：当额定电流流过一个绕组的线路端子且另一个绕组短路时，变压器在额定频率下所吸取的有功功率。

(2) 多绕组变压器(对于主分接)：指一对绕组中的一个额定容量较小的绕组的线路端子上流过额定电流时，另一个绕组短路且其余绕组开路时，变压器所吸取的有功功率。

附加损耗：由铁芯中磁通密度分布不均匀和漏磁通经过某些金属部件而产生的损耗。

空载损耗：当以额定频率的额定电压施加于一个绕组的端子上，其余绕组开路时，变压器所吸取的有功功率。

空载电流：当以额定频率的额定电压施加于一个绕组的端子上，其余绕组开路时，流过线路端子的电流。

损耗比：负载损耗与空载损耗之比。

阻抗电压(对于主分接)：

(1) 双绕组变压器：当一个绕组短路，以额定频率的电压施加于三相变压器另一个绕组的线路端子上，或施加于单相变压器另一个绕组的端子上，并使其中流过额定电流时的施加电压值。

(2) 多绕组变压器：当某一对绕组中的一个绕组短路，以额定频率的电压施加于三相变压器该对绕组中的另一个绕组的线路端子上，或施加于单相变压器该对绕组中的另一个绕组的端子上，其余绕组开路并使其中流过与该对绕组中的额定容量较小的绕组相对应的额定电流时的施加电压值。

短路阻抗(一对绕组的)：在额定频率及参考温度下，一对绕组中某一绕组的端子间的等效串联阻抗($Z = R + jX$)，此时，该对绕组中另一绕组的端子短路，其余绕组(如果有)开路。对于三相变压器，此阻抗是指每相的(等效星形连接)。对于带有分接绕组的变压器，短路阻抗是指某一分接位置上的。如无另外规定，它是指主分接上的。

电抗电压：阻抗电压中与电流相量垂直的分量。

电阻电压：阻抗电压中与电流相量同一方向的分量。

电压降或电压升(指定负载下的)：一个绕组的空载电压与该绕组在规定负载及规定功率因数时，在其端子上产生的电压算术差。

零序阻抗：在三相星形或曲折形连接绕组中，连接在一起的诸线路端子与中性点端子之间的以每相欧姆数表示的额定频率下的阻抗值。

变压器效率：输出功率与输入功率之比，以百分数表示。

恒磁通调压：变压器在不同分接位置时，其不带分接的绕组的分接电压恒定，带分接的绕组的分接电压与分接因数成正比。

变磁通调压：变压器在不同分接位置时，其带分接的绕组的分接电压恒定，不带分接的绕组的分接电压与分接因数成反比。

混合调压：在分接范围大的变压器中，通过恒磁通调压和变磁通调压两种调压方式，形成混合调压方式。此时，恒磁通调压部分适用于分接因数小于最大电压分接因数的一些分接，变磁通调压部分适用于分接因数大于最大电压分接因数的一些分接。

温升：变压器类产品中某一部位的温度与冷却介质温度之差。

冷却介质温度：对于空气冷却方式系指周围空气的温度；对于水冷却方式则指冷却设备入口处的水温。

1.2 变压器的工作原理

1.2.1 变压器在电力系统中的作用

1. 变压器的概念

变压器是借助于电磁感应原理，以相同的频率在两个或两个以上绕组之间变换交流电压和电流而传输电能的一种静止电气设备。

2. 变压器的作用

在电力系统中，向远方传输电能时，为了减少线路上电能损耗，需要升高电压，为了满足用电的要求，又需要降低电压，这就需要能实现变换电压、电流的变压器。同时，在整个电能生产、输送、分配、使用过程中，变压器占有极其重要的地位。

3. 电力系统中性点运行方式

电力系统中性点运行方式分为直接接地、经消弧线圈接地和不接地三种。中性点直接接地的方式一般用在 110 kV 及以上的系统，中性点不接地或经消弧线圈接地的方式一般用在 63 kV 及以下的系统。

1.2.2 变压器的工作原理

变压器的基本原理是电磁感应原理，是“电生磁、磁生电”现象的一个具体应用。无论是单相还是三相电力变压器，在其磁路构成的铁芯柱上，都装有一、二次绕组。现以单相双绕组（或三相中一相）变压器为例来说明，它由两个绕组和一个铁芯组成，其工作原理如图 1-1 所示。

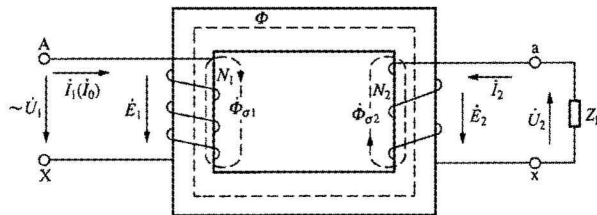


图 1-1 变压器工作原理图

当匝数为 N_1 的一次绕组（可以是高压侧，也可以是低压侧）接到频率为 f 、电压为 U_1 的交流电源时，很小的励磁电流 I_0 就在铁芯中产生主磁通 Φ ，以及经铁芯外回路的漏磁通 Φ_σ 。交变的磁通 Φ 在一、二次绕组中感应出电动势 E_1 和 E_2 ，则二次绕组以 ax 有电压 U_2 。当二次绕组接有负载 Z_L 时，有二次电流 I_2 流过，而此时的一次电流由空载时的 I_0 变为 I_1 。

当忽略绕组电阻和漏磁电抗时，由法拉第电磁感应定律可得

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m = 4.44fN_1B_mS \quad (1-1)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_m = 4.44fN_2B_mS \quad (1-2)$$

式中， f 为频率，Hz，工频频率为50Hz； N_1 、 N_2 分别为一、二次绕组的匝数； Φ_m 为主磁通的最大值，Wb； B_m 为主磁感应强度的最大值，T； S 为铁芯截面积， m^2 。

如令变压器的变比为

$$k = \frac{U_1}{U_2} \quad (1-3)$$

即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

可见，一、二次绕组的电压比等于匝数比。因此，只要改变两个绕组中任一绕组的匝数，就可改变一、二次绕组的电压比，从而实现改变电压的目的。

变压器通过电磁耦合关系，将一次侧的电能量传输到二次侧去，如果忽略漏磁因素，即变压器本身损耗不计，则向变压器输入的功率等于变压器向外输出的功率，即

$$U_1I_1 = U_2I_2 \quad (1-4)$$

或

$$I_1/I_2 = U_2/U_1 \quad (1-5)$$

所以

$$I_1/I_2 = U_2/U_1 = 1/k \quad (1-6)$$

说明变压器一、二次电流与一、二次绕组匝数成反比。

实际上变压器在运行中有铁损、铜损等损耗产生，也就是这个原因变压器在运行过程中才会发热。

1.2.3 变压器的相量图

1. 变压器各相量的正方向规定原则

变压器一次侧对电源来说相当于负载，所有一次侧相量的正方向按负载原则规定；二次侧对负载来说相当于电源，二次侧各相量的正方向按电源原则规定。各相量的标注原则（以图1-1为例）为：

(1) 一次电压 \dot{U}_1 正方向为由A指向X。

(2) 一次电流 \dot{I}_1 (\dot{I}_0) 正方向与 \dot{U}_1 正方向产生的电流一致时为正。

(3) 主磁通 $\dot{\Phi}$ 的正方向与一次电流 \dot{I}_1 符合“右螺旋”定则时为正。

(4) 一次电动势 \dot{E}_1 ，二次电动势 \dot{E}_2 及其他电动势与主磁通符合“右螺旋”定则时为正。

(5) 二次电流 \dot{I}_2 的正方向与 \dot{E}_2 正方向一致时为正。

(6) 二次电压 \dot{U}_2 的正方向与 \dot{I}_2 正方向一致时为正。

当变压器各相量按上述原则标注正方向以后，根据基尔霍夫第二定律，对图1-1电压方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ Z_1 &= r_1 + jx_1 \\ Z_2 &= r_2 + jx_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中, Z_1, Z_2 分别为一、二次侧的阻抗; r_1, r_2 分别为一、二次绕组的电阻; x_1, x_2 分别为一、二次侧漏磁感抗。

2. 变压器相量图的绘制

为了直观地分析变压器电与磁之间的关系, 常用相量图进行分析。应当注意的是, 在作相量图时一般将一、二次绕组匝数比假定为 1 (或认为折算到同一侧), 以下物理量右上角带撇号 “'” 的为二次侧折算到一次侧的折算值。这样就将变压器的一、二次绕组匝数看成是相等的, 于是可将一、二次侧各量画在同一图中, 如图 1-2 所示。作相量图的方法和步骤如下:

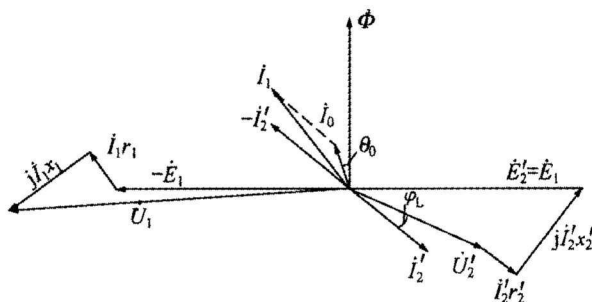


图 1-2 变压器感性负载时的相量图

- (1) 根据已知条件确定参考相量, 一般取 \dot{U}_2' 为参考相量。
- (2) 根据负载性质 $\cos\varphi_L$ 作出相量 \dot{I}_2' 。
- (3) 根据 $\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' r_2 + j\dot{I}_2' x_2'$, 作出相量 \dot{E}_2' ($\dot{E}_2' = \dot{E}_1$)。
- (4) 根据 $\Phi = j \frac{E}{4.44fN_1}$ 作出相量 Φ 。
- (5) 根据 $\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m}$ 作出相量 \dot{I}_0 。
- (6) 根据 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$ 作出相量 \dot{I}_1 。
- (7) 根据 $\dot{U}_1' = -\dot{E}_2' + \dot{I}_1' r_1 + j\dot{I}_1' x_1'$ 作出相量 \dot{U}_1' 。

1.2.4 变压器的等效电路

为了定量地分析问题, 可以利用比较简单、易于进行计算的等效电路来计算变压器的运行情况。变压器的等效电路, 就是用一个电路来代替变压器, 计算出实际变压器的运行情况, 如功率分布、电压变动等。

等效电路的表示方法就是将二次侧各量通过折算, 将本来变比不为 1 的变压器看成变

比为 1 的变压器，使一、二次绕组的电动势相等。二次绕组向一次绕组的折算方法为电压、电动势乘以变比值，电流除以变比值，阻抗类乘以变比的二次方忌。折算后的各量加上一撇表示。

折算后的二次电压方程式为

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j \dot{I}_2' x_2'$$

磁通势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_0$$

变压器以等效电路表示，常用的为 T 形等效电路，若将励磁阻抗 $r_m + jx_m$ 移于网络的输入端，并用 $r = r_1 + r_2'$ ， $x = x_1 + x_2'$ 来表示，就成为 Γ 形等效电路，若忽略空载电流 I_0 ，就成为简化等效电路，如图 1-3 所示。

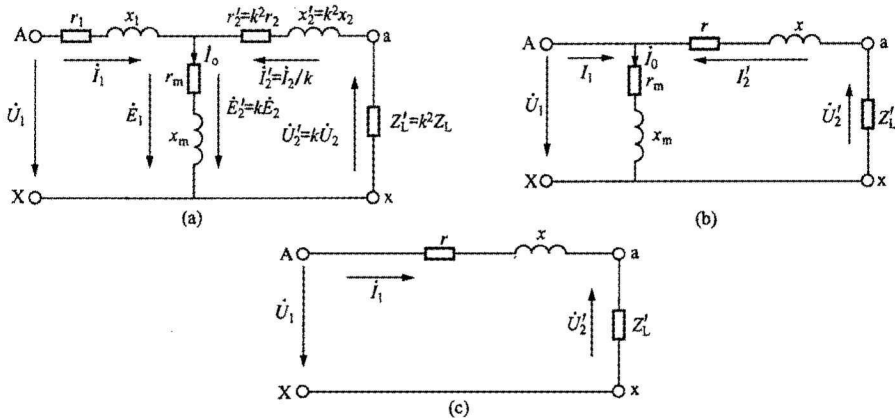


图 1-3 变压器等效电路图

(a) T 形等效电路；(b) Γ 形等效电路；(c) 简化等效电路

1.3 变压器的分类

变压器有不同的使用条件、安装场所，有不同的电压等级和容量级别，有不同的结构形式和冷却方式，所以应按不同原则进行分类。

1. 按用途不同

变压器分为电力变压器(又可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器、厂用变压器等)、特种变压器(电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等)、仪用互感器(电压互感器、电流互感器)、试验用的高压变压器和调压器等。

2. 按绕组构成不同

变压器分为双绕组、三绕组、多绕组变压器和自耦变压器。

3. 按铁芯结构不同

变压器分为芯式变压器和壳式变压器。

4. 按相数的不同

变压器分为单相、三相、多相(如整流用的六相)变压器。

5. 按调压方式不同

变压器分为无励磁调压变压器、有载调压变压器。

6. 按冷却方式不同

变压器分为干式变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环变压器、强迫循环导向冷却变压器、充气式变压器等。

7. 按线圈结构不同

变压器分为单线圈变压器、双线圈变压器、三线圈变压器及多线圈变压器。

8. 按中心点绝缘不同

变压器分为全绝缘变压器和半绝缘变压器。

1.4 变压器的结构

变压器的主要部件为一闭合磁路(铁芯)以及环绕着磁路的原边电路和副边电路(线圈)。图 1-4 是三相油浸式电力变压器外形。

铁芯和线圈是变压器进行电磁感应的基本部分,称为器身;此外,还有起机械支撑、冷却散热和保护作用的油箱;起绝缘作用的套管;起冷却和绝缘作用的油等。概括地说,变压器的主要构成部分有:铁芯、线圈、油箱、附件和变压器油。

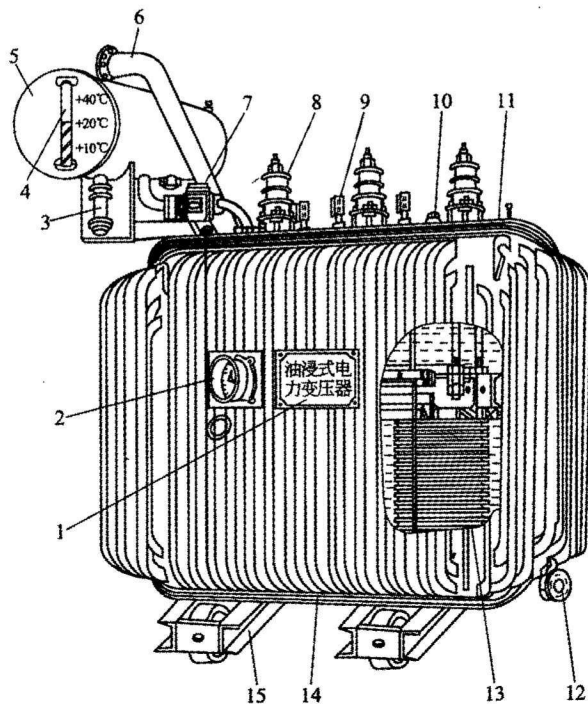


图 1-4 三相油浸式电力变压器外形

1. 铭牌;
2. 信号式温度计;
3. 吸湿器;
4. 油表;
5. 储油柜;
6. 安全气道;
7. 气体继电器;
8. 高压套管;
9. 低压套管;
10. 分接开关;
11. 油箱;
12. 放油阀门;
13. 器身;
14. 接地板;
15. 小车

1.4.1 铁芯

铁芯是变压器的主要部件之一，它构成变压器的磁路。只有绕组不用铁芯的变压器也能变压，但是由于空气的磁阻很大，漏磁十分严重，要求有很大的励磁电流，所以实际变压器必须用铁芯，它是变压器的磁路部分。由于变压器的工作原理是根据电磁感应来的，一、二次绕组间并没有电的直接联系，只有通过铁芯形成磁的联系。利用变压器铁芯，才能获得强磁场，增强一、二次绕组间的电磁联系，减少励磁电流。为了提高导磁系数和降低铁芯涡流损耗，铁芯用表面涂漆(或经处理)的硅钢片叠成。电工硅钢片很薄，变压器上目前一般用厚度为0.23~0.35mm的硅钢片。铁芯是能量转换的媒介，把一次电路的电能转为磁能，又由此磁能转变为二次电路的电能。

在结构上，铁芯的夹紧装置使磁导体成为一个机械上完整的结构，而且在其上面套有带绝缘的绕组，支持着引线，并几乎安装了变压器内部的所有部件。

铁芯的质量在配电变压器各部件中最大，在干式变压器中铁芯的质量占总质量的50%左右；在油浸式变压器中，由于有变压器油和油箱，质量的比例稍有下降，约为30%。

变压器的铁芯(即磁导体)是框形闭合结构。其中套绕组的部分称为芯柱，不套绕组只起闭合磁路作用的部分称为铁轭。现代铁芯的芯柱和铁轭在一个平面内，即为平面式铁芯，新式的立体铁芯呈三角形立体排列。

1.4.2 绕组

我国生产的电力变压器，基本上只有一种结构形式，即芯式变压器，所以它的绕组也都是采用同心绕组。所谓同心绕组，就是在铁芯柱的任一横断面上，绕组都是以同一圆心的圆筒形线圈套在铁芯柱的外面。在一般情况下总是将低压线组放在里面靠近铁芯处，将高压绕组放在外面。高压绕组与低压绕组之间，以及低压绕组与铁芯柱之间都必须留有一定的绝缘间隙和散热通道(油道)，并用绝缘纸板筒隔开。绝缘距离的大小，决定于绕组的电压等级和散热通道所需要的间隙。当低压绕组放在里面靠近铁芯柱时，因它和铁芯柱之间所需的绝缘距离比较小，所以绕组的尺寸就可以减小，整个变压器的外形尺寸也同时减小了。

同心绕组按其结构不同可以分为下列几种基本形式。

1. 圆筒形绕组

它是一个圆筒形螺旋体，其线匝是用扁线彼此紧靠着绕成的，如图1-5所示。圆筒形绕组可以绕成单层，如图1-5(a)所示；也可以绕成双层，如图1-5(b)所示。通常总是尽量避免用单层圆筒，而是绕成双层圆筒。因为绕成单层时，导线受到弹性形变的影响，线匝容易松开，使端部线匝彼此靠得不够紧，而绕成双层后，松开的倾向就小得多了。当电流较大时，也采用每一线匝由数根导线沿轴向并联起来绕成，但并联导线数通常不多于4~5根。

圆筒形绕组，其两端的两匝作为螺旋体的一部分，是处在一个与轴线成一定倾斜角的平面内，也就是说两端的两匝是斜的，为了使绕组能在平面上垂直竖立，在每层的起始一匝和最后一匝都放上两个用胶木或纸板条做成的端圈，如图1-5中(b)所示。圆筒形绕组与冷却介质的接触面积最大，因此冷却条件较好，但这种绕组的机械强度较弱，一般适用于小容量变压器的低压绕组。

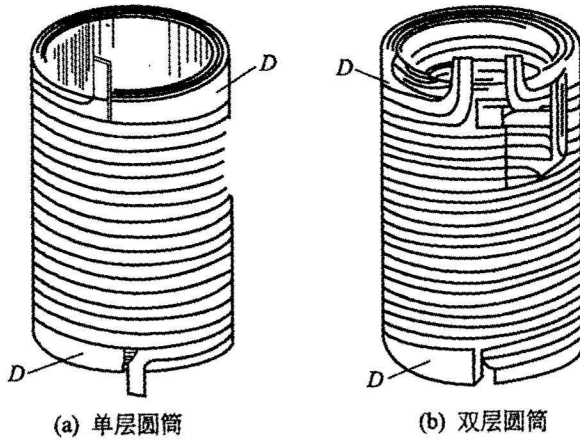


图 1-5 圆筒形绕组

2. 螺旋形绕组

容量稍大些的变压器的低压线组匝数很少(20~30匝以下),但电流却很大,所以要求线匝的横截面很大,因此要用很多根导线(6根或更多)并联起来绕。在圆筒形绕组里是不能用很多根导线并联起来绕的,因为这些导线要在同一层里一根靠着一根排列着绕,结果使线匝内螺距太大,这样的线圈很不稳固,而且它的高度也没有很好地利用,所以在并联导线的数目较多时,仍采用圆筒形绕组是不适宜的,于是就有所谓螺旋形绕组出现,如图1-6所示。圆筒形绕组实际上也是螺旋形的,不过这里所讲的螺旋形绕组每匝并联导线的数量比较多,而且是沿径向一根压着一根地叠起来绕。图1-6(b)所示的,是螺旋形绕组导线匝间排列的一部分(只拿出其中4匝),每匝有6根导线并联,把6根并联的导线绕成一个螺旋,各个螺旋不是像圆筒形绕组那样彼此紧靠着,而是中间隔着一个空的沟道。图1-6(a)为螺旋形绕组绕成后的外形。

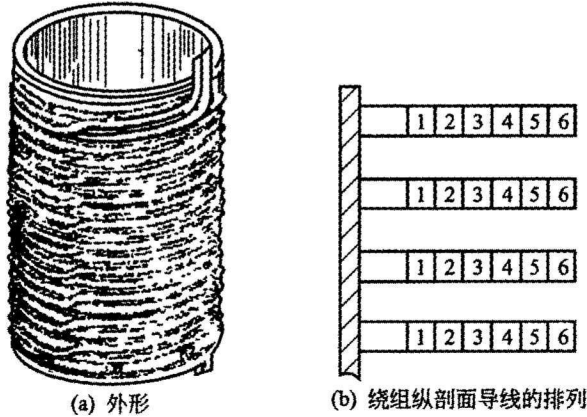


图 1-6 螺旋形绕组

当螺旋形绕组并联导线更多时(例如12根),就把并联导线分成两组并排起来绕,这样就绕成了双层螺旋,图1-6(a)所示的即为双层螺旋。由于导线会产生附加损耗,导线的截面积越大,附加损耗也就越迅速地增加,为了减少这些附加损耗,螺旋形绕组的并联导线要进行换位。换位是要使并联的每根导线不像图1-6(b)所示的那样保持它在径向不变的位置,例如在没有换位时,第6根导线在整个线圈高度里永远是在最外层,而利用换

位就可以使外层导线依次序占据所有可能的径向位置，如图 1-7 中涂黑的导线所示。这样的换位叫做完全换位，因为每一根导线换位，都需要多余的地方，以致过分地增加了线圈的轴向尺寸，实用中多采用半数线匝换位，如图 1-8 所示。螺旋形绕组的内径较大，都在 300 mm 以上，如内径小于 300 mm 左右，绕弯时就比较困难，所以对小容量变压器来讲，就不宜采用螺旋形绕组。

在温升和绝缘条件允许时，螺旋形绕组可以采用正常宽度的油道和小油道(约为 1.5~2 mm)交错绕线的结构，小油道的宽度约为正常油道宽度的一半左右，所以称为半螺旋。绕组为单螺旋时称单半螺旋；绕组为双螺旋时称双半螺旋。这种半螺旋绕组的空间利用系数比较高，在大中型变压器中都广泛地应用着。

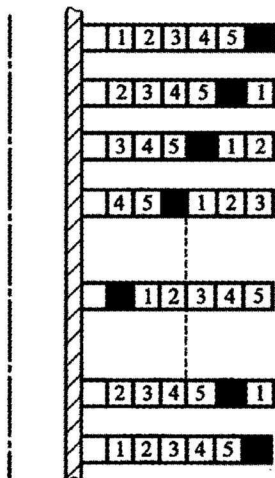


图 1-7 螺旋形绕组换位时导线的位置

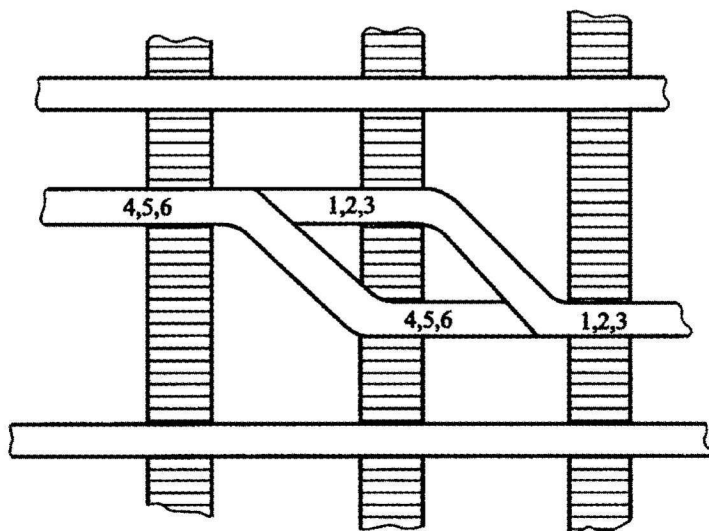


图 1-8 螺旋形绕组的半数线匝换位

3. 换位导线绕成的绕组

为了减少大型变压器的低压绕组在采用多股导线并绕时所产生的附加损耗，绕组往往需要做换位处理，但又为了不使绕组的轴向高度增加得太多，通常又不是采用完全换位，